

Экспериментальные исследования эффективности применения широкополосных цифровых каналов преобразования сигналов при РСДБ-наблюдениях

© Д. А. Маршалов, А. Е. Мельников, Л. В. Федотов

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Представлены результаты исследований использования широкополосной цифровой системы преобразования сигналов (ШСПС) в регулярных РСДБ-наблюдениях на радиотелескопах РТ-13. Экспериментально показана совместимость каналов ШСПС с каналами аналогичных зарубежных систем и возможность проведения совместных РСДБ-наблюдений. Сравнение результатов наблюдений на РТ-13 и на РТ-32 показало, что при использовании ШСПС потери чувствительности из-за уменьшения диаметра антенн полностью компенсируются. Приведена оценка точности определения поправок Всемирного времени при РСДБ-наблюдениях с использованием ШСПС.

Ключевые слова: радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами, система преобразования сигналов, радиоинтерферометрические наблюдения.

Введение

В 2015 году в ИПА РАН на основе радиотелескопов РТ-13 создан 2-элементный радиоинтерферометр для оперативного мониторинга Всемирного времени в интересах фундаментального обеспечения системы ГЛОНАСС [1] методами радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ). Радиотелескопы РТ-13 в обсерваториях «Зеленчукская» и «Бадары» оснащены разработанными в ИПА РАН системами ШСПС с полосой регистрации 512 МГц в каждом из 8 каналов [2, 3] для компенсации потерь чувствительности радиоинтерферометра при уменьшении диаметра используемых антенн. Проведенные ранее на радиотелескопах РТ-32 исследования прототипа ШСПС экспериментально подтвердили возможность такой компенсации [4]. Однако опыта использования таких широкополосных каналов в реальных РСДБ-наблюдениях до сих пор практически не было ни в нашей стране, ни за рубежом. Поэтому в ИПА РАН были проведены специальные исследования эффективности применения широкополосных каналов в РСДБ-наблюдениях, результаты которых приводятся ниже.

Исследование совместимости каналов ШСПС с каналами аналогичных зарубежных систем

В 2015–2016 годах было проведено несколько международных экспериментальных сеансов РСДБ-наблюдений на радиотелескопах РТ-13 в обсерваториях «Зеленчукская» и «Бадары». В апреле – мае 2015 года они участвовали в международных наблюдениях совместно с обсерваториями «Ветцель» (Германия) и «Йебес» (Испания). Обработка сеансов проводилась независимо на трех корреляторах: DiFX в ИПА РАН и в Институте им. М. Планка (Германия), а также на новом FX-корреляторе ИПА РАН на основе графических процессоров [5]. Обработка подтвердила характеристики ШСПС, каналы которой работали совместно с зарубежными системами DBBC2.

В сентябре-ноябре 2015 года радиотелескопы РТ-13 с установленными на них ШСПС участвовали в серии из 8 наблюдательных сессий (табл. 1) совместно с обсерваторией «Йебес» [6], где использовались европейские системы DBBC2 как в режиме цифрового гетеродинирования DDC (Digital Down Converter), так и в режиме полифазной фильтрации сигналов PFB (Poly-phase Filter Bank).

Таблица 1

Параметры сеансов РСДБ-наблюдений «Зеленчукская»–«Бадары»–«Йебес»

Сессия	Дата	Число наблюдений	Число каналов, диапазон, поляризация, полоса частот
RU0179	09.09.2015	40	ZvBv: 3XLCP, 1SLCP, 512МГц
RU0180	10.09.2015	39	Yj: 8XRCP, 8SLCP, 32МГц в режиме PFB
RU0181	11.09.2015	39	
RU0191	14.10.2014	44	ZvBv: 3XLCP, 1SLCP, 512МГц Yj: 8XRCP, 16МГц в режиме DDC Yj: 8XRCP, 8SRCP 32МГц в режиме PFB
RU0192	15.10.2015	44	ZvBv: 3XLCP, 1SLCP, 512МГц Yj: 4XRCP, 4SRCP 16МГц в режиме DDC
RU0222	09.11.2015	75	ZvBv: 3XLCP, 1SLCP, 512МГц
RU0224	10.11.2015	77	Yj: 8XRCP, 16МГц в режиме DDC
RU0263	20.11.2015	109	Yj: 8XRCP, 8SRCP 32МГц в режиме PFB

Во всех наблюдениях использовалось 2-битовое квантование и регистрация только нижней боковой полосы сигнала. Данные были обработаны на корреляторе DiFX 2.4.1 в ИПА РАН (рис. 1). Результаты обработки показали, что на каждом сеансе для взвешенной среднеквадратической погрешности измерения групповой задержки сигнала по всем трем базам с учетом формальных ошибок коррелятора может быть достигнуто значение не более 50 пс [6], что подтвердило совместимость оборудования DBBC2 и ШСПС.

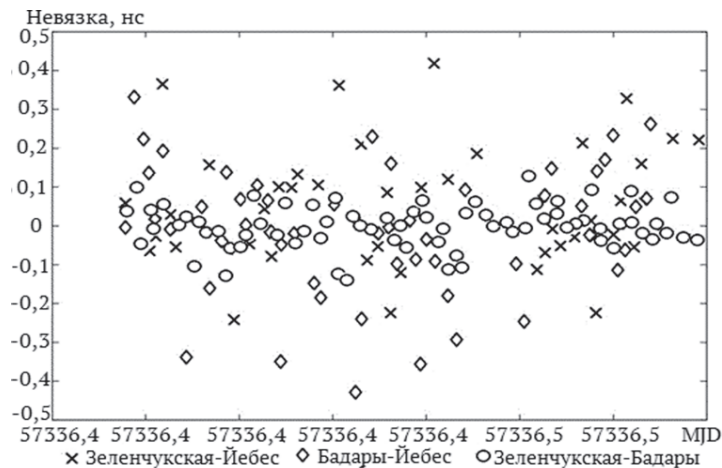


Рис. 1. Невязки (абсолютная погрешность измерения групповой задержки сигнала с учетом вычисленных параметров линейного тренда влажной составляющей тропосферной задержки, квадратичного тренда рассинхронизации часов и смещения шкал времени) при РСДБ-наблюдениях на базах «Зеленчукская» – «Йебес», «Бадары» – «Йебес» и «Зеленчукская» – «Бадары» на сеансе RU0224 10.11.2015

28 октября 2015 года ШСПС участвовали в экспериментальных наблюдениях с 65-метровым радиотелескопом Тиан Ма (Китай), а в декабре 2015 — в международных наблюдениях по программе FAST [7], в которых использовались обсерватории «Зеленчукская», «Бадары», «Йебес» и «Ветцель». 16 декабря были проведены 2 сеанса наблюдений, на которых совместно с 3-мя каналами ШСПС шириной 512 МГц каждый работали 16 узкополосных каналов систем DVBC в «Йебесе» и «Ветцеле» в режимах PFB и DDC. Узкополосные каналы DVBC2 в режиме DDC настраивались в S и X диапазонах длин волн так, чтобы при корреляционной обработке осуществлять синтез полосы частот. При этом сигналы регистрировались аппаратурой Mark5B+ в формате VSI-H. Минимальное время наблюдения каждого источника (длительность скана) составляло 20 секунд. Для сопряжения широкополосных каналов ШСПС и узкополосных каналов DVBC2 в обсерваториях «Зеленчукская» и «Бадары» от каждого из наблюдаемых источников регистрировался в формате VDIF только каждый четвертый скан. Наблюдения были успешно обработаны на корреляторах в Бонне и в ИПА РАН. При этом из полосы частот сигналов, зарегистрированных в «Зеленчукской» и «Бадарах», выделялись только те участки спектра, которые были одновременно зарегистрированы в «Йебесе» и «Ветцеле». Затем на каждом участке был найден корреляционный отклик и производился синтез полосы частот. Полученные результаты, в частности, наличие взаимной корреляции в течение всех 32 часов наблюдений с вероятностью обнаружения корреляционных откликов 99.9 % и отбраковка менее 1 % сканов, по которым невозможно найти корреляционный отклик, подтвердили совместимость ШСПС с зарубежными системами.

1 ноября 2016 года впервые был проведен сеанс РСДБ-наблюдений с регистрацией сигналов в полосе частот 512 МГц совместно с обсерваторией «Ишиока» (Ishioka Geodetic Observing Station) Института географии Японии (Geospatial Information Authority of Japan). В эксперименте участвовали радиотелескопы РТ-13 в обсерваториях «Зеленчукская», «Бадары» и «Ишиока» (табл. 2).

В «Зеленчукской» и «Бадарах» — 2 канала ШСПС, а в «Ишиока» — 1 канал разработанной в Японии системы К6. Регистрация сигналов с выходов ШСПС осуществлялась в формате VDIF, а с выхода системы К6 — без специального форматирования (RAW). Обработка результатов произведена на корреляторе DiFX в ИПА РАН. При этом для преобразования формата RAW в VDIF была разработана специальная программа – конвертер. По всем источникам и всем базам были получены четкие корреляционные отклики, качество которых получило наивысшую оценку (9 баллов по шкале от 0 до 9). Результаты показали стабильность амплитуды и фазы откликов в течение каждого скана, а также стабильное и четкое выделение гармоника сигнала фазовой калибровки, что должно обеспечить возможность синтеза полосы частот при регистрации сигналов в нескольких каналах.

Таблица 2

Параметры сеанса наблюдений «Зеленчукская» – «Бадары» – «Ишиока»

База	Источник	Сигнал/шум	Групповая задержка, пс	Частота интерференции, 10^{-7} мкс/с
«Бадары»– «Зеленчукская»	0059+581	462.5	-25.25	0.511477
«Бадары»–«Ишиока»		213.4	8.28	-2.342000
«Ишиока»– «Зеленчукская»		173.5	-82.03	2.944140
«Бадары»– «Зеленчукская»	0552+398	460.7	-274.41	1.883450
«Бадары»–«Ишиока»		196.6	-157.22	-3.541560
«Ишиока»– «Зеленчукская»		80.0	-125.00	5.275660

Сравнение результатов наблюдений на РТ-13 и РТ-32

В течение всего 2016 года проводились регулярные ежедневные РСДБ-наблюдения на радиоинтерферометре «Бадары» – «Зеленчукская» с использованием широкополосных цифровых каналов преобразования сигналов. При этом на радиотелескопах РТ-13 использовались каналы ШСПС с шириной полосы частот регистрации сигналов 512 МГц. Обработка результатов наблюдений производилась на корреляторе ИПА РАН, куда РСДБ-данные

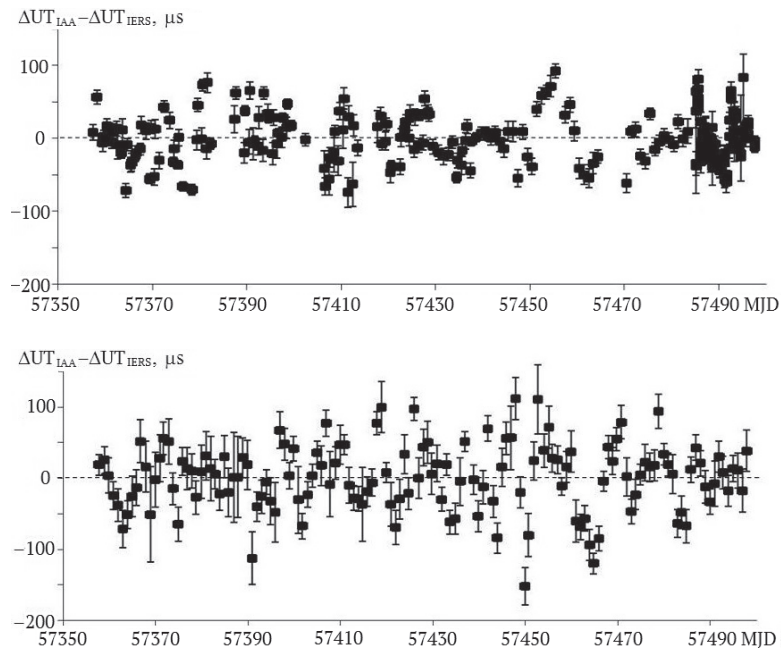


Рис. 2. Погрешности определения поправок Всемирного времени (среднеквадратическое отклонение разностей с рядом IERS 08 C08 после удаления тренда) по результатам РСДБ-наблюдений на радиотелескопах РТ-13 с помощью ШСПС (верхний рисунок) и на телескопах РТ-32 с помощью штатной аппаратуры (нижний рисунок) с декабря 2015 по май 2016 года

передавались по широкополосным каналам связи [8]. В результате определялись значения поправок Всемирного времени. Одновременно проводились плановые РСДБ-наблюдения на радиотелескопах РТ-32 по программам Ru-I и Ru-F, которые обрабатывались в Центре корреляционной обработки ИПА РАН (рис. 2).

Сравнение результатов, полученных в один и тот же день при наблюдениях на РТ-13 и на РТ-32, показывает, что по среднеквадратической погрешности определения значений групповой задержки сигнала при наблюдении источников со спектральной плотностью потока излучения в пределах от 1 до 6 Ян радиоинтерферометр на радиотелескопах РТ-13, использующий ШСПС, практически не уступает радиоинтерферометру на радиотелескопах РТ-32, в котором используется штатная узкополосная аппаратура преобразования сигналов (рис. 3). То есть потери чувствительности радиоинтерферометра из-за перехода на антенны меньшего диаметра (13 метров) компенсируются за счет использования широкой полосы приема сигналов. При наблюдениях слабых источников со спектральной плотностью потока излучения менее 1 Ян преимущества больших антенн остаются заметными.

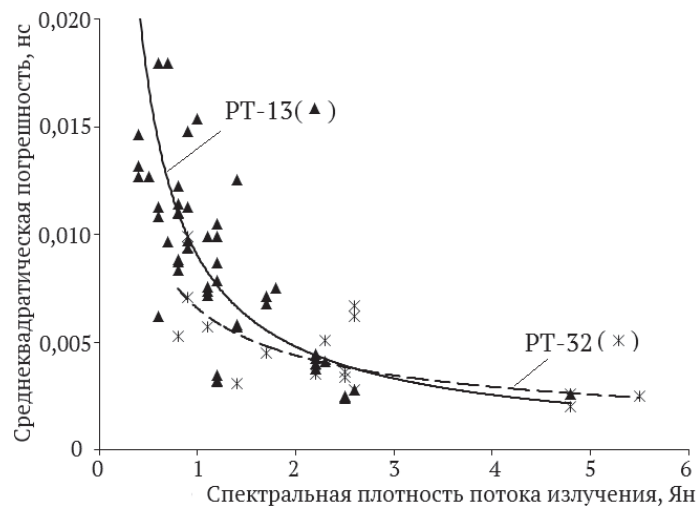


Рис. 3. Зависимость среднеквадратической погрешности определения групповой задержки сигнала на базе «Бадары» – «Зеленчукская» в X-диапазоне длин волн от спектральной плотности потока излучения источников по результатам наблюдений на радиотелескопах РТ-13 и на радиотелескопах РТ-32 14 апреля 2016 года: экспериментальные результаты и усредненные кривые

Заключение

Экспериментальные исследования показали, что система ШСПС, установленная на радиотелескопах РТ-13, может быть успешно использована для совместных РСДБ-наблюдений с зарубежными радиотелескопами, оснащенными различными системами преобразования сигналов, в частности, системами DVBC2 или K6. Использование ШСПС на радиотелескопах РТ-13 для регистрации сигналов в широкой полосе обеспечивает компенсацию потерь чувствительности радиоинтерферометра, основанного на быстроповоротных антеннах диаметром 13 м, и позволяет определять поправки Всемирного времени при РСДБ-наблюдениях со средней точностью не хуже 30 мкс. При этом могут использоваться практически те же источники космического радиоизлучения, что и при наблюдениях на радиотелескопах РТ-32.

Литература

1. Ипатов А. В. Радиоинтерферометр нового поколения для фундаментальных и прикладных исследований // Успехи физических наук. — М.: Наука, 2013. — Том 183, № 7. — С. 769–777.
2. Кольцов Н. Е., Маршалов Д. А. и др. Цифровая система преобразования широкополосных сигналов для астрономических радиоинтерферометров / Кольцов Н. Е., Маршалов Д. А., Носов Е. В., Федотов Л. В. // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. — СПб.: СПбГЭТУ, 2014. — Вып. 1. — С. 34–40.

3. Бердников А. С., Гренков С. А. и др. Перспективная цифровая широкополосная система преобразования сигналов BRAS для РСДБ-радиотелескопов / Бердников А. С., Гренков С. А., Крохалев А. В., Маршалов Д. А., Носов Е. В., Федотов Л. В., Кольцов Н. Е. // Труды ИПА РАН. — СПб.: ИПА РАН, 2013. — Вып. 27. — С. 96–101.

4. Федотов Л. В., Кольцов Н. Е. и др. Результаты испытаний радиоинтерферометра с цифровым преобразованием сигналов в полосе 400 МГц / Федотов Л. В., Кольцов Н. Е., Маршалов Д. А., Гренков С. А., Носов Е. В., Мельников А. Е. // Приборы и техника эксперимента. — М.: Наука, 2014. — № 1. — С. 72–76.

5. Суркис И. Ф., Зимовский В. Ф. и др. Программный коррелятор для обработки наблюдений РСДБ-сети малых антенн. Результаты первых испытаний / Суркис И. Ф., Зимовский В. Ф., Кен В. О., Курдубова Я. Л., Мишин В. Ю., Мишина Н. А., Шантырь В. А. // Труды ИПА РАН. — СПб.: ИПА РАН, 2016. — Вып. 36. — С. 83–89.

6. Melnikov A., de Vicente P., et al. First 2 Gbps observations between KVAZAR VGOS antennas and Yebes RAEGE antenna / Melnikov A., de Vicente P., Kurdubov S., Mikhailov A. // IVS 2016 General Meeting Proceedings. «New Horizons with VGOS». Edited by D. Behrend, K. D. Baver, and K. L. Armstrong. NASA/CP-2016. — P. 40–43.

7. Neidhardt A., de Vicente P., et al. First results of the FAST-S/X-sessions with new VGOS antennas / Neidhardt A., de Vicente P., Bertarini A., Artz T., Ivanov D., Melnikov A., Böhm J., Hellerschmied A., Mayer D., Plötz C., Kronschnabl G., Kurdubov S., Mikhailov A., Marshalov D., Bezrukov I., Bondarenko Y. // IVS 2016 General Meeting Proceedings. «New Horizons with VGOS». Edited by D. Behrend, K. D. Baver, and K. L. Armstrong. NASA/CP-2016. — P. 96–100.

8. Яковлев В. А., Безруков И. А. и др. Передача РСДБ-данных в широкополосном канале связи / Яковлев В. А., Безруков И. А., Сальников А. И., Вылегжанин А. В. // Труды ИПА РАН. — СПб.: ИПА РАН, 2016. — Вып. 39. — С. 127–133.

Experimental Studies of the Broadband Digital Signal Conversion Channels Used in VLBI Observations

D. A. Marshalov, A. E. Melnikov, L. V. Fedotov

A digital broadband acquisition system (BRAS) has been studied in its operation during our regular VLBI observations through the RT-13 radio telescopes. The results of these studies are presented. The compatibility of the BRAS channels with the channels of similar foreign systems and the possibility to carry out joint VLBI observations have been demonstrated. The compared results of the RT-13 and the RT-32 observations show that when using the BRAS, the loss of sensitivity due to the reduction in the diameter of the antennas is completely compensated. We have estimated the accuracy of the UT corrections determined during the VLBI observations which use the BRAS.

Keywords: VLBI, data acquisition system, observations.